真空管アンプと半導体アンプを比較

スピーカーの特性を左右するパワーアンプの出力インピーダンス

新井悠一 ARAI Yuichi

オーディオ専科のKT88プッシュプルパワーアンプ

一般に真空管アンプではスピーカーユニットの公称インピーダンス値を前提に特性を表示するが，実際のドライバーのインピーダンスは周波数による変化が大きく，アンプの駆動条件は一定にはならない．真空管アンプと半導体アンプの負荷を変化させながら駆動特性を測定し，ユニットとアンプの動作様態を明らかにした．

真空管アンプの駆動特性

手許にあった森川忠勇氏設計のKT88プッシュプルアンプ（**タイトル写真**）を実験台にしました．このアンプ固有の特性を調べるのが目的ではなく，あくまで私の実験室における真空管アンプの代表としての登場です．

このアンプには，4，8，16Ωの出力端子が用意されています．一般に真空管アンプは出力が限られるので，スピーカーの負荷インピーダンスに合わせて出力インピーダンスを合わせて結線します．インピーダンスマッチングによって電力伝送効率を最大化できるからです．しかし，ハイファイ再生のためには必ずしも出力端子のΩ数がアンプの出力インピーダンスというわけではありません．

アンプの出力インピーダンスは次のように測定します．

アンプへ正弦波を入力し，出力端子に負荷抵抗R_1を接続し，両端にV_1の電圧（実効値）が観測されたとします．次に，入力はそのままで負荷抵抗をR_2に変更したときの電圧をV_2とします．すると内部損失，つまりインピーダンスは次式で表されます．

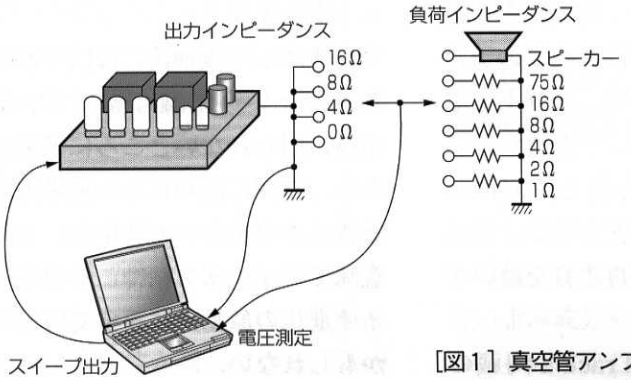
$$Z=\frac{(V_1-V_2)\cdot R_1\cdot R_2}{R_1\cdot V_2-V_2\cdot V_1} \quad (式1)$$

この場合，負荷抵抗をR_1とR_2に変えていますが，片方を開放にしても構いません．しかし大きな入力を与えた場合など問題があるので，一般式としてこのようにしました．

一般にアンプの周波数特性は超高域と超低域でゲインが落ちますが，その他のほとんどの領域ではフラットなので，位相変化も同様に上下を除いて0°です．式1の計算では，ある周波数のインピーダンスしかわかりませんが，超高域と超低域を除けば，ほぼ全域で同じと考えてよいでしょう．ちなみにこのアンプの100Hzでのインピーダンスを測定すると，次のようになりました．

4Ω端子：2.15Ω
8Ω端子：4.18Ω
16Ω端子：7.64Ω

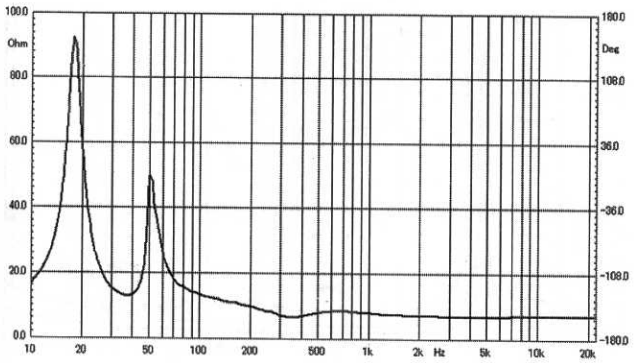
以上からダンピングファクターDFは，8Ω出力端子に公称8Ωインピーダンスのスピーカードライバーを接続した場合，おおむね2となります．



［図1］真空管アンプ駆動特性測定結線図

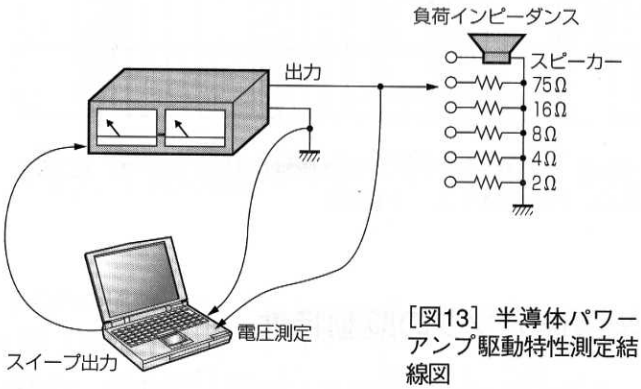
測定方法

今回の実験におけるアンプの「インピーダンス－周波数特性」の測定結線図を**図1**に示します．真空管アンプの場合は，出力側は4，8，16Ωの選択と，負荷側に1，2，4，8，16，75，150Ωの純抵抗，

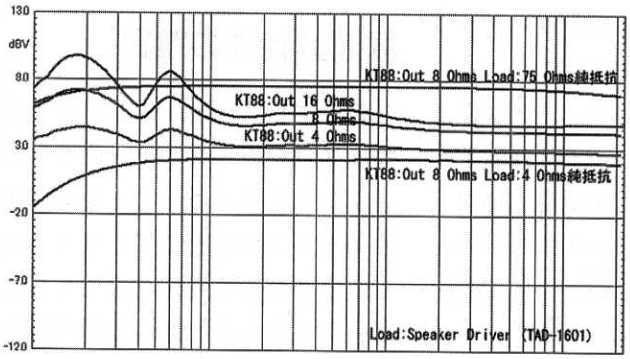


[図11] TL-1601ユニットのバスレフインピーダンス特性図

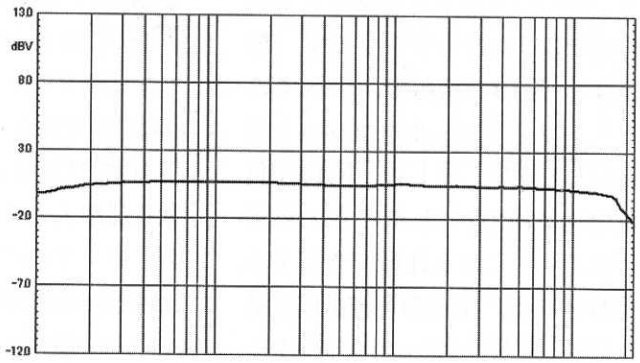
[写真2] 半導体コンポーネントアンプの例



[図13] 半導体パワーアンプ駆動特性測定結線図



[図12] 真空管アンプの8Ωユニット TL-1601負荷特性
(下から出力端子4，8，16Ω)



[図14] 半導体パワーアンプ8Ω純抵抗負荷電圧特性

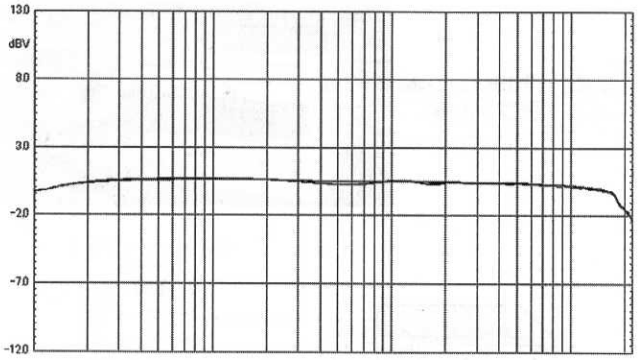
ピーダンスが極端に高くなると駆動電圧は飽和してきます．

こうした変動は**図3**がすべてを表しており，この中でドライバーのインピーダンス変動に応じて駆動電圧が変動することになりますが，実感としては予想を上回る大きさです．負荷インピーダンスが高くなると電流はそれほど流れませんので，高出力インピーダンスアンプは「定電流駆動的」な動作に近づくといえるかもしれません．

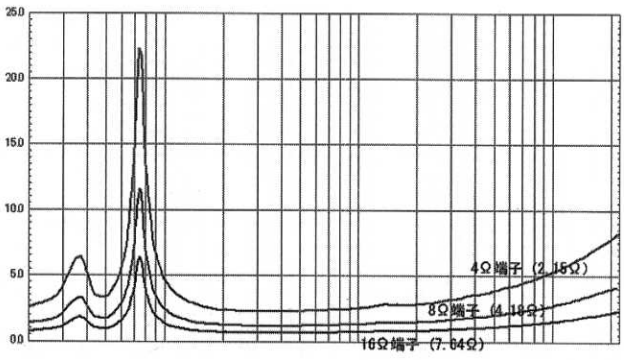
その他のドライバーについてもいくつか測定してみます．エーモン工業の車載用17cm口径同軸型ユニットASS-2717Cで同様な測定を行いました．自由空間インピーダンスを**図7**に示します．このユニットは5Ωが公称インピーダンスです．この例ではトゥイーターとのクロスオーバーネットワークのために5kHz近辺で盛り上がっています．したがってアンプで駆動したときの駆動電圧特性は**図8**のように低域に加え中高域も盛り上がっています．

バスレフエンクロージャーに収納したパークオーディオ（ドリームクリエーション）の13cm口径ウッドコーンフルレンジユニットDCU-F131W（**写真1**）のインピーダンス特性は公称6Ωで**図9**となります．バスレフのために低域は2山になっていますし，インピーダンス補正をしていないので高域での特性は上昇しています．これを負荷とした駆動特性は**図10**となり4Ω，75Ωの間で変動します．なお，この図ではユニットの公称インピーダンスが6Ωだったため，アンプの出力端子は4Ωと8Ωで測定しました．

もう一例，パイオニアの38cm口径ウーファーユニットTL-1601をバスレフエンクロージャーに収納した場合の特性を示しておきます．**図11**がインピーダンス特性，これによって駆動電圧は**図12**のように変動します．この場合の3個のカーブは下から4Ω，8Ω，16Ωのアンプ出力端子に接続した特性です．このウーファーはエンクロージャー内部でインピーダンスの高域補正が施されていますので，高域での大きな変動はありません．



[図15] 半導体パワーアンプ負荷電圧特性（4，8，16Ω純抵抗，PE-16Mユニット負荷）



[図16] KT88アンプで駆動したDCU-F131WDF特性（下から出力端子16，8，4Ωに接続）

半導体アンプの駆動特性

ここで用いたアンプはどこででも見かけるようなCDプレーヤーまで入ったミニコンポーネント型のオールインワンアンプです（**写真2**）．**図13**の結線で，すべてのトーンコントロールをフラットに設定して測定しました．**図14**が負荷を純抵抗8Ωとしたときの駆動特性です．これと比較できるよう，負荷を4，8，16Ωの各純抵抗，それに8ΩスピーカーユニットPE-16Mを接続し，すべての駆動電圧特性を測定して重ね表示したものが**図15**です．差異がわかりやすいように描画の線幅を細かくしましたが，**図14**のようにどれもまったく変わりがなく，変動もありません．つまり完全な電圧駆動がなされていることがわかります．

現実のDF値

通常，真空管アンプのDF値は固定の純抵抗負荷を前提に表示されていますが，実際は負荷となるドライバーによって変わってきます．どんな負荷がかかるかわからなくては性能表示ができないので，パワーアンプ単体としては純抵抗負荷を前提とするしかありませんが，実負荷ではどんな特性になるのでしょうか．

前記のバスレフエンクロージャーに収納したDCU-F131Wユニットを使って試算します．アンプ側の出力インピーダンスは4Ω端子で2.15Ω，8Ω端子で4.18Ω，16Ω端子で7.64Ωなので，ユニットのインピーダンスをこれらの値で割ればDF特性が得られるはずです．CLIOでは計算に当たり実数部と虚数部を入力することができますが，アンプの出力インピーダンスはほとんど位相がゼロなので実数部のみを使いました．

図9がスピーカーシステムのインピーダンス特性なので，CLIOの計算機能を使って計算すると，**図16**のDF特性が得られます．CLIOにはDF測定の項目がないので，画面をPC上で一部変更し，縦軸をOhmsに代えてDF値としました．3本のカーブが描かれていますが，負荷を下からそれぞれ16Ω端子，8Ω端子，4Ω端子に接続した場合に相当します．当然ですがインピーダンスが公称値，つまりもっとも低いところでDFが最低となり，インピーダンスの高いところはDFも高くなっています（このインピーダンス測定はMLSインパルス法のため，**図9**とは若干異なる特性を示しています）．

周波数特性の差異

概してDFが低い真空管アンプではスピーカーユニットのインピーダンス特性によって，駆動電圧が予想以上に変動してしまうことが測定されました．結果としてスピーカーから放射される周波数特性はどのくらいの差異になるものか調べるため，DCU-F131Wスピーカーシステムを使って「音圧―周波数特性」を比較しました．このスピーカーのインピーダンスは**図9**から実測５Ωくらいと判断できますが，あくまで公称インピーダンス値は，この図のように全体から見ればごくわずかの領域であることを理解すべきでしょう．

図17はKT88アンプの8Ω出力端子に接続した場合の周波数特性です．振動板とベント位置の中間の場所で，ニアフィールド特性を測りました．したがって高域ではマイク位置がユニット軸上から逸れるため若干減衰が目立ちますが，ここでは主題ではないので，この条件で比較します．

図18はKT88出力端子の4Ω，16Ωに接続した場合での音圧特性で，下から4，8，16Ωと重ねて表示したものです．特記すべきは出力インピーダンスが高くなると，低域と高域は２～3dB音圧が高くなり